DIODES ÉLECTROLUMINESCENTES BLANCHES ET ÉCLAIRAGE GÉNÉRAL : QUEL POTENTIEL ET QUELS PROBLÈMES ?

C'est en 1907 que H.J. Round rapporta la première émission de lumière par un semi-conducteur [Ro-1]. Sans explication évidente, cette découverte fut rapidement oubliée. Il fallut attendre 1962 pour que Nick Holonyak et S.F. Bevacqua de General Electric signent « l'acte officiel » de naissance de la diode électroluminescente rouge [Ho-1]. Depuis, les événements se sont accélérés. En 1968, la première diode électroluminescente (ou Led, abréviation du terme « Light Emitting Diode ») commercialisée produisit une lumière rouge d'à peine 0,001 lm. Aujourd'hui des lampes Leds blanche de 5 W existent sur le marché et produisent plus d'une centaine de lumens (120-125 lm). Ce rapide historique montre bien que même si de gros problème demeurent et rendent encore impossible une pénétration rapide et large sur le marché de l'éclairage, il est réaliste d'imaginer que les Leds ont de l'avenir sur ce segment.

Aujourd'hui, selon Russ Arensman [Ar-1] le marché mondial des Leds pèse presque 3 milliards d'euros et son taux de croissance annuel est de 14 %. Si ce rythme se confirme et se maintient pendant les 5 années à suivre, ce segment du marché représenterait en 2009 pas loin de 6 milliards d'euros pour dépasser les 10 milliards dans la décennie à suivre. Cependant, aujourd'hui la pénétration des Leds dans le domaine de l'éclairage général reste de l'ordre de 5 % (voir figure 1). Cette part augmentera-elle dans les années à suivre ? Malgré l'optimisme général soutenu par des avancées scientifiques spectaculaires reprises en fanfare par les fabricants, cette question demeure aujourd'hui sans réponse claire. L'objectif de ce dossier est de donner quelques éléments qui permettront au lecteur de se faire sa propre opinion.

Principes généraux, fonctionnement

Schématiquement, le principe de fonctionnement d'une Led est le suivant : l'élément de base de toute diode électroluminescente est un semi-conducteur ayant deux régions de conductivité différente (de type p et n) et une région de recombinaison

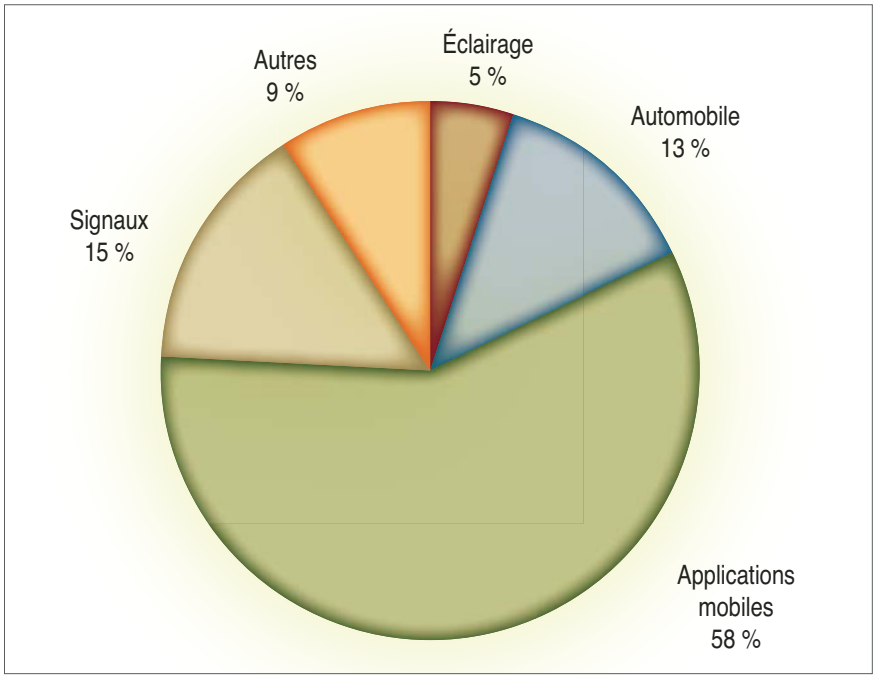

Figure 1 : Marché des Leds en 2004, il représente 3 milliars d'euros.

radiative des porteurs « n » (électrons) et « p » (trous). Sous l'effet d'une différence de potentiel appliquée entre les deux couches, des électrons pénètrent dans la couche de type n. Ceci équivaut à une injection de trous dans la couche de type p. À l'interface de ces deux zones, les électrons et les trous se recombinent en donnant naissance à un photon. D'où l'émission de lumière (voir figure 2).

À l'état d'équilibre, les porteurs majoritaires de chaque zone diffusent vers l'autre zone : les électrons de la zone « n » ont tendance à diffuser vers la zone « p », les trous suivent le chemin opposé. Ces mouvements spontanés perturbent la neutralité électrique locale du système et sont à l'origine de l'apparition d'un champ de « charge espace » qui s'oppose, à son tour, à ces mouvements et le système s'équilibre. Par conséquent le nombre de porteurs minoritaires dans chaque zone (électrons dans la zone p et trous dans la zone n) reste extrêmement faible et la probabilité de recombinaison radiative est quasi-nulle. En appliquant maintenant à la jonction une tension de polarisation directe V, la barrière de potentiel s'abaisse d'une valeur égale à e x V, où e est la charge élémentaire. Par conséquent, le courant de diffusion des porteurs majoritaires de chaque côté de la barrière vers la zone opposée augmente par un facteur proportionnel à exp(eV/kBT), où T est la température de la jonction et kB la constante de Boltzmann. Cette augmentation du courant de diffusion déséquilibre le système et aboutit à une croissance de la population des porteurs minoritaires dans chaque zone. Si la tension de polarisation directe est suffisante, la probabilité de recombinaison radiative n'est plus négligeable et des photons sont produits par la jonction.

Le principe énoncé ci-dessus correspond à une diode électroluminescente dite « homo-jonction ». Les Leds classiques utilisent encore aujourd'hui cette structure, mais, les nouvelles diodes de forte intensité utilisent des jonctions bien plus complexes dites « hétéro-jonctions ». Elles reposent sur la variation spatiale de la composition du semi-conducteur. Ces structures sont des assemblages de semi-conducteurs de différentes compositions chimiques ayant également des différents « gaps » énergétiques. Aujourd'hui, nous utilisons des hétéro-structures simples (SH) ou doubles (DH).

Avantages et problèmes des Leds

Les Leds véhiculent beaucoup d'espoirs pour l'éclairage parce qu'elles possèdent des avantages majeurs :

- fort potentiel de développement de leur efficacité (100 % théorique de transformation de l'électricité en lumière),
- grande durée de vie : l'objectif annoncé, et qui fait consensus, est d'obtenir une diode d'une durée de vie de 40 000 à 50 000 heures d'ici 2025 (plutôt que les 100 000 heures espérées il y a quelques années),
- couleurs saturées de bonne qualité, assurant une bonne perception de la lumière par l'utilisateur,
- alimentation aisée, faible demande en énergie,
- légèreté.

Mais il existe également des inconvénients, bien connus, eux aussi. Les points qui posent actuellement problème sont les suivants :

- Le schéma précédent montre clairement que les Leds ne peuvent produire que des « plumes » de lumières : la lumière est à la fois directionnelle et monochromatique. C'est évidemment un énorme défaut pour l'éclairage général (où l'on a besoin d'une lumière diffuse et non éblouissante). Pour corriger ce problème il faut une optique lourde, chère et qui nuit à l'efficacité lumineuse. Cette caractéristique cantonne par ailleurs actuellement les applications aux spots d'éclairage et à l'éclairage d'appoint.
- Le vieillissement est erratique, la couleur « dérive avec le temps ». Le flux produit par les Leds blanches diminue presque linéairement dès la première heure

Vue en coupe d'une puce semi conductrice présente dans une Led

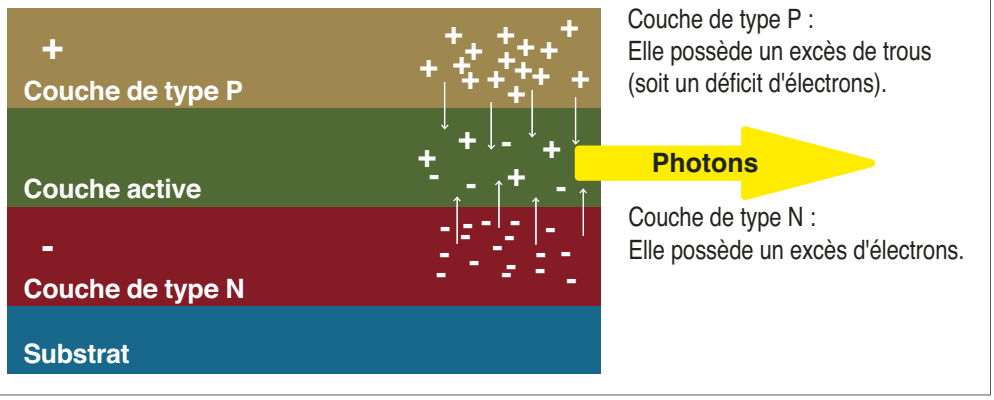

Figure 2 : Principe simplifié de fonctionnement des Leds
(source : site portail sur les Leds : http://www.led-fr.net/led.htm).

de fonctionnement. Des mesures de la chute du flux ont été réalisées sur une diode blanche de 1 W (données 2000, on ne fait guère mieux aujourd'hui…). La figure 3 montre que le flux diminue de moitié en 6 000 heures. Des progrès dans ce domaine sont donc également nécessaires pour que les diodes électroluminescentes puissent, un jour, dominer le marché de l'éclairage.

- Il existe des problèmes de reproductibilité de production en grande série : pour la Led blanche uniquement (température de couleur non identique).
- Les Leds sont limitées à de faibles puissances : inférieures à 5 W, actuellement. Il s'agit essentiellement d'un problème de management thermique de la jonction car la chaleur engendrée par le fonctionnement de la diode modifie ses performances.
- La consommation énergétique est faible. Cette constatation contribue à lui donner une image « écologique », mais la technique de production, elle, est moins « verte » (industrie des semi-conducteurs)… Il faut situer ce point par rapport à l'industrie des lampes actuelle qui est très propre (peu de produits toxiques générés).

Ces problèmes que nous signalons ici sont une « photo », réalisée à la mi-année 2006 et feront peut-être sourire dans quelques années, mais personne ne peut le garantir ni ne peut dire à quelle vitesse ils seront dépassés.

Axes de recherche actuels pour les Leds

Actuellement les scientifiques investissent beaucoup, bien sûr, sur les Leds, et l'on peut parler de phase de développement. Les principaux axes sont les suivants :

L'un des problèmes majeurs des Leds est que la lumière émise est monochromatique. Du coup, une des problématiques essentielle pour la recherche consiste à travailler sur l'obtention d'une « Led blanche » ayant une efficacité de plus de 100 lm/W tandis qu'aujourd'hui les jonctions commerçables présentent une efficacité de 25 lm/W.

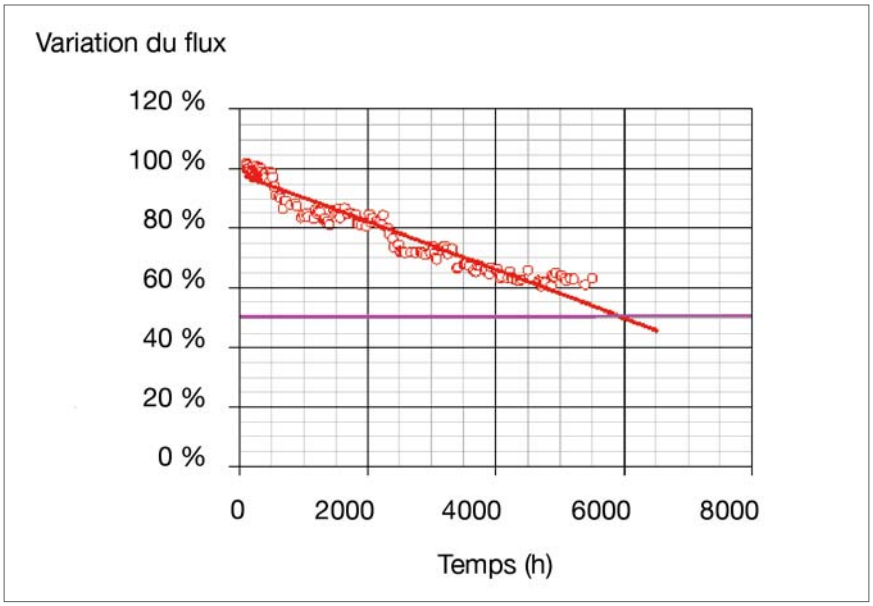

Figure 3 : Ce graphique donne la pente de la chute du flux pour la diode blanche de 1 W : chute de 50% en 6 000 heures (données 2000).

Dans un « papier blanc » commandé par le Sénat des États-Unis, R. Haitz et all. ont élaboré 2 scénarii [Ha-1] : le premier, simplement « évolutionnaire » prévoit pour 2010 une diode blanche de 50 lm/W tandis que, le deuxième, dit « révolutionnaire », vise un dispositif de 200 lm/W d'ici 2025.

Selon le premier scénario, les 50 lm/W semblent être un objectif réaliste que l'on peut atteindre sans effort considérable. Dans ce contexte, les Leds peuvent très bien remplacer d'ici 2025, 20 à 30 % des lampes à incandescence et halogènes. Ceci entraînerait une économie d'énergie de l'ordre de 400 TWh/an (correspondant à une réduction de capacité de production de 50 GW).

Dans le deuxième scénario, atteindre une efficacité de 200 lm/W nécessite clairement un effort considérable. Dans ce cas, les Leds seraient susceptibles de remplacer les lampes fluorescentes et pourraient représenter plus de 50 % de parts du marché des sources de lumière d'ici 2025-2030. L'économie d'énergie escomptée serait de l'ordre de 1000 TWh/an (correspondant à une réduction de capacité de production de 120 GW).

Ainsi, l'objectif annoncé clairement par les chercheurs américains est de concevoir, avant 2011, des diodes électroluminescentes blanches avec une efficacité de 160 lm/W, une durée de vie de plus de 5 ans et un coût inférieur à 1 euro / diode. Il s'agit d'un pari ambitieux à l'issue incertaine, mais le Congrès des États-Unis a voté en 2001 l'acte S.1166 allouant la somme de 430 millions de dollars pour l'exécution du projet [Se-1]. L'Europe, à son tour, dans le cadre de la plateforme technologique Photonics21, s'est fixée en 2005 comme objectif une Led blanche de 150 lm/W à l'horizon 2030 ce qui semble bien plus réaliste. Cependant le budget alloué à cette action est encore incertain [Ph-1].

Il existe actuellement trois méthodes pour réaliser une diode électroluminescente émettant de la lumière blanche [Zi-1] :

- Combiner une diode émettant une longueur d'onde courte λ1 avec un luminophore (phosphore) émettant une longueur d'onde complémentaire λ2 (longue).
- Utiliser une diode, émettant dans l'ultraviolet proche, couplée à un ou plusieurs luminophores.
- Utiliser trois diodes (au moins) émettant des longueurs d'ondes visibles qui se combinent pour donner une lumière blanche.

Chacune de ces trois méthodes présente des avantages et des inconvénients.

La première méthode est basée sur le fait que deux photons de longueurs d'onde complémentaires (λ1 « court » et λ2 « long ») arrivant simultanément sur l'œil humain provoquent une sensation de lumière blanche. L'idée principale est donc d'utiliser une diode produisant la longueur d'onde courte, recouverte par un phosphore qui absorbera quelques photons courts pour les convertir en une autre longueur d'onde plus longue. En principe une infinité de combinaisons est possible. En pratique, plusieurs constructeurs (Nishia, CREE, Lumileds…) produisent en série des diodes blanches de forte puissance (allant jusqu'à 5 W aujourd'hui) en utilisant une diode bleue (InGaN) combinée avec un phosphore jaune (YAG-Ce). À court terme, cette technologie dominera probablement le marché de la diode blanche.

Elle présente néanmoins deux inconvénients :

- la diode a un effet de halo qui peut être gênant pour certaines applications. Ceci est dû à la production de lumière directionnelle par la diode blanche tandis que le phosphore a un comportement « lambertien » (émission diffuse).
- Le phosphore jaune n'absorbe pas facilement les photons bleus. Ce problème est lié au fait que les phosphores jaunes actuels présentent une très faible absorption dans le bleu à cause des terres rares utilisées comme éléments dopants. La solution du problème semble être complexe et nécessite une recherche fondamentale de longue durée.

Arriver à une efficacité de 200 lm/W (une lampe à incandescence de 100 W a une efficacité de 14 lm/W) pour la production de la lumière blanche avec cette technologie couplée à des phosphores existants nécessiterait une diode avec une efficacité totale de conversion de 60 %. Aujourd'hui, la meilleure efficacité rapportée est de 45 % à une longueur d'onde de 610 nm.

La deuxième méthode consiste à utiliser une diode produisant une longueur d'onde courte (dans l'ultraviolet proche ou dans le violet) couplée à un (ou plusieurs) phosphore(s) qui transforme la lumière UV en visible. Cette même technique est utilisée aujourd'hui par les lampes fluorescentes. Elle présente l'avantage de pouvoir créer de la lumière blanche de très bonne qualité (bon Indice de Rendu des Couleurs). Appliquer cette technologie pour obtenir les 200 lm/W dont nous avons parlé précédemment nécessite une diode UV ayant une efficacité totale de 70 %. Des diodes produisant des photons à 400 nm (violet) existent mais l'efficacité atteint à peine 21 %. L'augmenter à 60-70 % est un défi magnifique mais probablement irréaliste dans l'état actuel de l'art. Cependant, nous constatons aujourd'hui une forte activité de recherche dans ce domaine. Le développement des diodes UV efficaces avec une longue durée de vie et une puissance suffisante représente un challenge important à la fois pour l'éclairage mais, surtout, pour d'autres systèmes utilisant le rayonnement UV dans certaines applications (dermatologie, traitement de surface, décontamination…). Si cette technologie fait ses preuves et si, dans le future, les recherches sur les luminophores amènent sur le marché des phosphores blancs de bonne qualité et fiables, alors cette technique risque de devenir la technologie dominante pour la production de la lumière blanche par les Leds.

Enfin, la troisième méthode consiste à utiliser trois diodes électroluminescentes, une pour chaque couleur principale (rouge, vert et bleu). La synthèse de trois couleurs mène à la production de la lumière blanche dont la teinte et la température de couleur dépendent de la proportion de chacune des trois composantes. Étant donné que les dimensions d'une diode sont faibles, nous pouvons envisager la création de sources de lumière blanches « composites » auxquelles l'adjonction d'un diffuseur permettrait d'améliorer considérablement l'homogénéité de la source. Cette méthode présente plusieurs avantages : éviter l'utilisation des luminophores, permettre un bon contrôle de la qualité de la lumière (indice de rendu de couleur, température de couleur de la source). Cependant, cette technologie a un défaut majeur : il faut contrôler « individuellement » chaque diode élémentaire parmi plusieurs dizaines (voire dans certains cas des centaines) de Leds qui constituent la source composite. Il faut aussi prendre en compte le fait que les diodes de chaque couleur élémentaire nécessitent une tension d'alimentation différente. Une conséquence directe de ces défauts est l'augmentation du prix de la source de lumière. Enfin, comparée à une lampe classique de même flux lumineux, la « surface » de la source composite est considérable. Appliquer cette solution pour atteindre l'objectif de 200 lm/W implique l'utilisation de diodes électroluminescentes avec une efficacité de 50 % pour toutes les couleurs…

Enfin, selon différents auteurs, (dont OIDA - Optoelectronics Industry Developpment Association), les différentes directions sont jugées pertinentes [OI-1] :

- Recherche fondamentale sur les matériaux et la génération de la lumière : il faut tout d'abord mieux comprendre les mécanismes de génération de lumière par les semi-conducteurs. Pour cela il faut développer de nouvelles techniques de diagnostic adaptées aux Leds et des modèles mathématiques plus sophistiqués que ceux dont nous disposons aujourd'hui. Dans l'immédiat, la compréhension des problèmes liés aux défauts de dopage de type p et à l'incorporation de fortes concentrations d'indium et d'aluminium dans les diodes vertes InGaN et AlGaInN, nous conduisent à la création de diodes vertes plus efficaces. L'étude du confinement des porteurs dans les Leds à base de phosphides semble, quand à elle, être la clef pour la réalisation de diodes rouges beaucoup plus efficaces.
- Matériaux pour les substrats : aujourd'hui pour la création des diodes de la famille GaN, qui semblent être parmi les plus prometteuses, il faut utiliser des substrats en saphir, SiC ou bien GaN. Chacun de ces trois matériaux présente des avantages et des inconvénients. Toutefois, nous ne savons pas produire des grandes surfaces sans défaut avec ces matériaux. La solution de ce problème doit être considérée comme une priorité dans ce domaine. Par ailleurs, il serait souhaitable de pouvoir diminuer le coût de production du substrat à moins de 70 euros/cm^2 (pour les diodes UV, vertes et bleues).
- Technologie des réacteurs pour la création des diodes par épitaxie[1] : les réacteurs utilisés pour la production en série des diodes électroluminescentes de la famille GaN ne sont que des machines créées pour la production des diodes en GaAs. Si leur fiabilité est bonne pour la production des diodes en GaAs, elle est déplorable pour la réalisation des diodes modernes en GaN. Ainsi, les diodes produites en série par ces machines présentent quasi-systématiquement des efficacités 1,5-2 fois inférieures à celles constatées sur les prototypes. Par ailleurs, dans la même série produite par une machine on peut constater d'importantes dispersions de caractéristiques. L'exemple caricatural est le tri manuel en fonction de la « couleur » effectué à la fin de la ligne de production des diodes blanches de forte intensité… Pour avancer dans ce domaine, il vaut mieux comprendre la chimie du processus et les mécanismes de croissance des nitrides afin d'optimiser les réacteurs.
- Luminophores : les problèmes liés à la faible absorption de la lumière bleue par les phosphores jaunes ont déjà été évoqués. Dans un premier temps, il convient de développer des luminophores capables d'absorber et de convertir efficacement des photons de longueurs d'onde comprises entre 370 et 470 nm. Dans un deuxième temps il sera nécessaire d'étudier d'autres combinaisons possibles de couleurs complémentaires et de développer des phosphores adéquats. Par ailleurs, comme pour les lampes fluorescentes, le développement des « quantum-splitting phosphors »[2] marquera une étape décisive pour les Leds.
- Extraction de la lumière et packaging : l'amélioration des caractéristiques optiques des substrats et contacts transparents, des couches réfléchissantes… constitue un axe de recherche important dans un futur proche. Améliorer la géométrie des jonctions afin d'augmenter l'efficacité de l'extraction de la lumière, ou même faire appel à des structures complexes comme les cristaux photoniques sont des challenges à plus long terme. Enfin, il ne faut pas oublier que la jonction n'est qu'une petite partie de la diode, et que le packaging[3] joue un rôle primordial pour son efficacité et sa fiabilité. Des défis d'ordre technologique sont à prévoir dans ce domaine. Par exemple, pour une diode de forte intensité, il faudrait un matériau transparent et facilement usinable ayant un indice de réfraction supérieur à 1,6 et une transmittance de 80 % de 440 à 650 nm susceptible de bloquer complètement des photons courts (λ<440 nm). Ce matériau doit conserver ces caractéristiques pendant au moins 50 000 heures tout en étant soumis à une température de 150°C. Enfin, il faut que la concentration d'eau dans ce matériau reste de l'ordre de quelques ppm et que ces caractéristiques mécaniques soient compatibles avec l'application envisagée…
- Luminaires et électronique : pour que les Leds puissent pénétrer le marché de l'éclairage, il faut

[1] ***Épitaxie :*** *Phénomène de croissance orientée, l'un par rapport à l'autre, de deux cristaux appartenant à deux espèces minérales différentes mais possédant un certain nombre d'éléments de symétrie communs dans leurs réseaux cristallins.*

[2] ***Quantum-splitting phosphors :*** *Technologie qui permet d'obtenir pour un photon UV initial d'énergie E deux ou trois photons visibles d'énergie E1, E2, E3 (E>E1+E2+E3). Le cas idéal, mais à notre connaissance pas encore réalisé, consiste à mettre en jeu un photon bleu, un vert et un rouge, pour obtenir de la lumière blanche… Ces phosphores sont très chers et impliquent un recyclage à la fin de vie de lampe. Cette technologie profitera essentiellement aux lampes fluorescentes avec ou sans mercure et aux Leds émettant dans l'ultraviolet.*

[3] ***Packaging :*** *Terme dédié à l'industrie des Leds qui désigne l'intégration d'une « jonction semi-conducteur » dans une Led (dôme en époxy, phosphore, liaisons électriques, radiateur thermique…).*

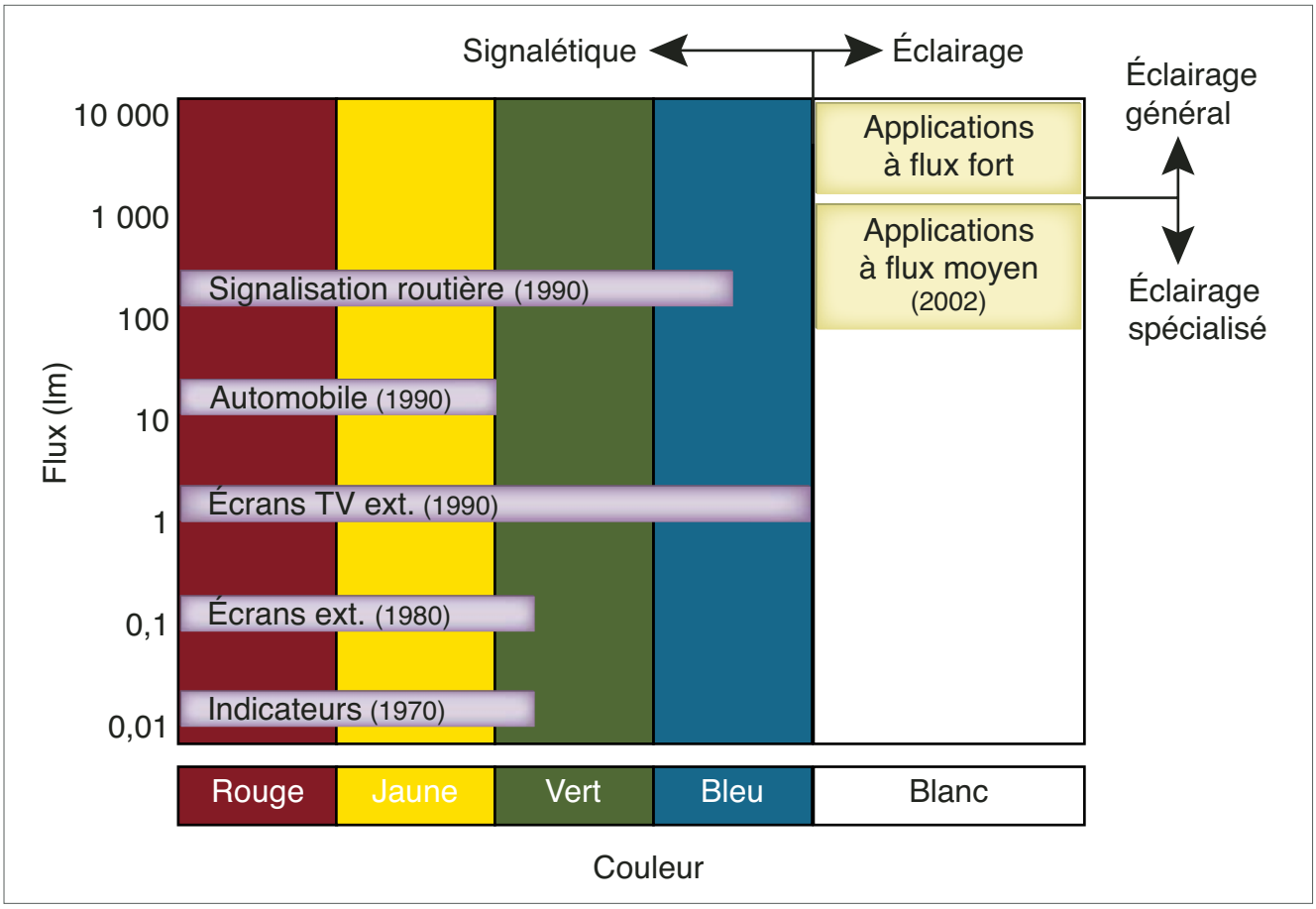

Figure 4 : Domaine d'application des diodes électroluminescentes en fonction de leur flux émis et de leur couleur.

développer des luminaires spécifiques qui prennent en compte la forte directivité de la lumière, les faibles dimensions de la source de lumière et surtout sa sensibilité à la température, l'humidité et tout autre facteur corrosif rencontré dans son environnement. Enfin, compte tenu du fait que la production d'une quantité de lumière suffisante pour l'éclairage général implique un nombre important de Leds, une électronique de commande sophistiquée est nécessaire. Notons ici que la couleur d'une Led est très sensible à la fois à la tension et au courant de l'alimentation. Une faible variation sur l'une ou l'autre de ces grandeurs provoque une importante dérive de la couleur. Par ailleurs, le comportement de chaque diode se modifie avec le temps (le flux baisse, la couleur dérive) plus ou moins lentement ; mais à cause des lacunes au niveau de la production (voir précédemment) cette variation est différente d'une diode à l'autre. Il faut donc les contrôler une à une…

Applications actuelles, perspectives pour les Leds

Aujourd'hui les diodes électroluminescentes peinent à démontrer leur efficacité dans le domaine de l'éclairage général. Toutefois, elles ont fait leurs preuves dans la signalétique et commencent à pénétrer le marché de l'éclairage spécialisé. La figure 4 résume les domaines de l'application des Leds en fonction de leur couleur et de leur flux. Les applications de signalétique nécessitent souvent de faibles flux lumineux et une lumière monochrome. Pour l'éclairage, nous avons besoin d'une lumière blanche et de flux lumineux importants. Par ailleurs, si dans les années 1970 une seule Led assurait la fonction « d'indicateur » (marche / arrêt, panne, niveaux…) sur la façade des appareils électriques, des systèmes de signalisation plus complexes (par exemple les feux tricolores de trafic) utilisent plusieurs dizaines de Leds pour assurer une seule fonction. La création de diodes de forte intensité aboutira sans doute à des systèmes destinés à l'éclairage, qui assureront leur fonction avec un nombre limité de diodes.

Ainsi, le marché de l'éclairage, pour les Leds, concerne surtout l'éclairage en spots, pour des applications décoratives ou festives : « spots à Leds » blancs ou colorés (voir la figure 5).

L'éclairage général, et notamment en lampes interchangeables avec

Diodes électroluminescentes blanches et éclairage général

© Paulmann

Figure 5 : Spots Leds colorés (1 W) du fabricant Paulmann, actuellement sur le marché.

© Paulmann

Exemple d'utilisation décorative de Leds.

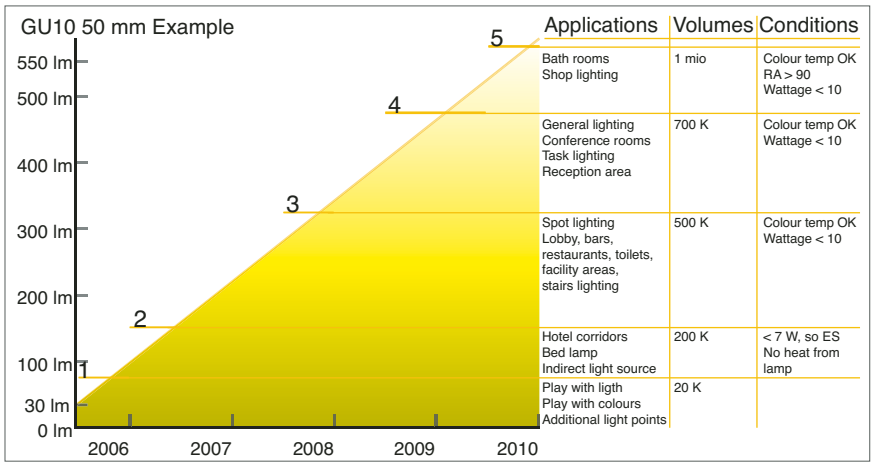

Figure 6 : « Led retrofit Market Roadmap 2006/2007 » Philips, Présentation pour EDF, mai 2006 [Ri-1].

les lampes à incandescence (GLS), est encore une perspective pour les Leds ; tous les fabricants s'y intéressent, bien sûr. La « roadmap » de Philips sur ce segment prévoit, par exemple, un début des applications en éclairage général pour 2009 (nous sommes actuellement en phase 1, c'est-à-dire des applications purement décoratives) (voir figure 6)…

En marge de l'éclairage, on voit également émerger des applications de signalisation originales, dont la plus récente est l'illumination de la façade d'un immeuble en Autriche, à Vienne [Ba-1]. Les Leds semblent ainsi percer également le segment de « l'illumination architecturale », où elles permettent un repérage des édifices et leur mise en valeur (*via* les façades surtout, mais à l'intérieur des bâtiments, également). En France, une réalisation similaire existe à la Roche-sur-Yon (Vendée) (voir figure 7).

Toutes ces applications émergentes posent ainsi la question du développement massif des Leds dans l'éclairage (et notamment l'éclairage résidentiel). Sur ce point les avis sont partagés. S'il est à peu près sûr que les Leds alimenteront ce marché, la question de l'échéance pour cette évolution est plus délicate. À notre avis, l'avenir des Leds se joue sur le long terme. Les Leds prendront le relais des lampes fluorescentes compactes (dites « lampes basse consommation ») pour finir d'éliminer les lampes incandescentes du marché. Mais il ne peut s'agir que d'hypothèses.

Comme nous avons dit précédemment, les objectifs annoncés clairement par les chercheurs pour les 15 années à venir constituent des paris ambitieux. Sont-ils réalistes ?

Répondre à cette question par « oui » ou par « non » reviendrait à spéculer sur la forme d'un puzzle auquel manquent des pièces maîtresses !

Georges Zissis
Université de Toulouse 3 - Paul Sabatier
georges.zissis@cpat.ups-tlse.fr
Éric Castano
Gister Innovation
eric.castano@gister.fr

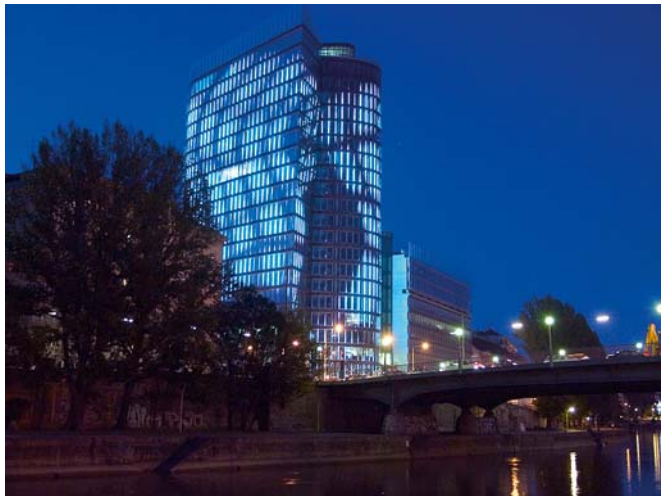
© Barco, 2006

Figure 7 a : Première installation Led permanente sur la façade d'une tour en Autriche (immeuble-tour de la société UNIQA à Vienne), par la société Barco (Belgique) : 45 000 modules Led recouvrant une superficie totale de 7 000 m² [Ba-1].

En complément de ce dossier vous trouverez une synthèse documentaire réalisée par l'Inist à cette adresse : http://www.inist.fr/ecrin

© Photothèque ville de La Roche-sur-Yon

Figure 7 b : Éclairage décoratif, esplanade Mazurelle, la Roche-sur-Yon (Vendée) [We-1].

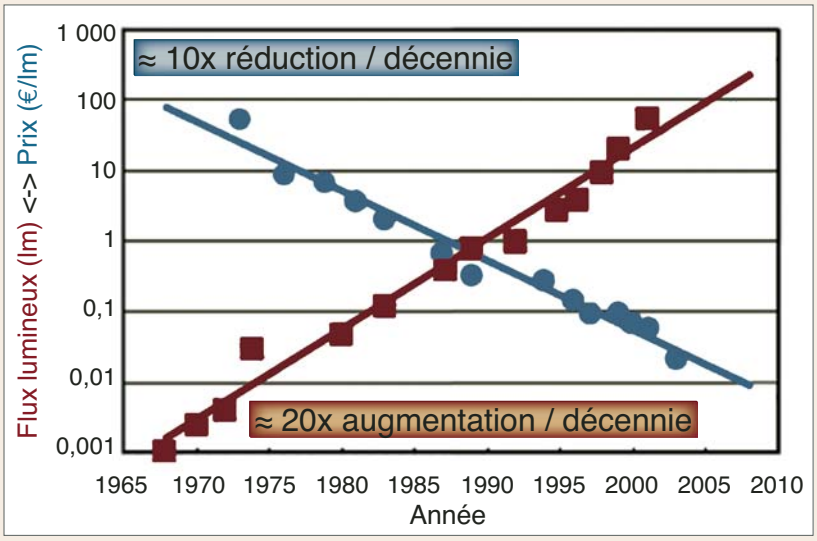

Figure 8 : Évolution du flux lumineux produit par les Leds et de leur prix (loi de « Craford »).

Un argument clé, souvent utilisé par les « défenseurs » des Leds, est la rapide évolution de la quantité de lumière (flux) produite par chaque diode. En effet, comme le montre la figure 8, le flux par diode est multiplié par 20 tous les dix ans. En parallèle, le prix diminue d'un facteur 10 au cours de la même période. Aujourd'hui, les chercheurs appellent ces tendances les « lois de Craford ». Ces arguments sont très encourageants. Mais, il ne faut pas oublier que les quantités illustrées sur la figure 8 ne concernent pas seulement les Leds blanches, mais les diodes de toutes les couleurs. Par ailleurs, personne ne peut garantir l'extrapolation de ces deux courbes jusqu'à 2020-2030. Leur évolution peut se maintenir, s'estomper ou même s'accélérer.

Références bibliographiques

[Ar-1] Russ Arensman, « Led market lights up », Reed Business Information, a division of Reed Elsevier Inc, Electronic Business 4/1/2005.

[Ba-1] « Barco pénètre le marché de l'architecture avec une première installation Led permanente sur une façade », site web Barco, 2006.

[Ha-1] Roland Haitz, F. Kish, J. Tsao, J. Nelson, « Another semiconductor revolution : This time it's lighting », Comp. Semiconductor Magazine, March 2002.

[Ho-1] Nick Holonyak et S.F. Bevacqua, Applied Physics 1(4), pp. 82-83, 1962.

[Na-1] « Solid-state Lighting Research and Development Portfolio », Navigant Consulting Inc (USA), mars 2006.

[OI-1] « Light Emitting Diodes (Leds) for General Illumination », OIDA, Road Map Update 2002.

[Ph-1] « Towards a Bright Future for Europe - Strategic Research Agenda in photonics », Photonics21 EU Joint Technology Platform, April 2006.

[Ri-1] Paul-Alban Riché (Philips), Réunion « La révolution de l'éclairage par les Leds », Sophia Antipolis, 29 juin 2006.

[Ro-1] H. J. Round, Electrical World 49, p. 309, 1907.

[Se-1] US Senate Bill S.1166, « To establish the Next Generation Lighting Initiative at the Department of Energy, and for other purposes. », The US Senate, 11/07/2001.

[We-1] R. Weitzel (Osram) « Better light for a better future », 1st COST-529 workshop « Lighting Technology: Challenges for the future », Toulouse June 2002.

[Zi-1] G. Zissis, « Diodes électroluminescentes pour l'éclairage », Cahiers Innovation IN-18, Techniques de l'ingénieur 5 pp 1-13, (mai 2004).